

Isótopos estables aplicados al estudio de los sistemas paleoagrícolas mediterráneos

J.P. Ferrio, J. Voltas¹, R. Buxó², J.L. Araus³

(1) Departament de Producció Vegetal i Ciència Forestal, Universitat de Lleida, Avda. Rovira Roure 191, E-25198 Lleida, España.

(2) Museu d' Arqueologia de Catalunya, Girona. Pedret, 95. 17007 Girona.

(3) Unitat de Fisiologia Vegetal, Facultat de Biologia, Universitat de Barcelona, Avda. Diagonal 645, Barcelona E-08028, España.

El origen y progresivo desarrollo de la agricultura es probablemente el primer ejemplo de interacción recíproca a gran escala entre la humanidad y el medio ambiente. Por tanto, reconstruir las condiciones ambientales que caracterizaron la adopción de la agricultura es de gran interés de cara a conocer sus causas potenciales, así como para comprender los efectos a largo plazo de la economía agrícola sobre el ambiente. En este trabajo presentamos la metodología desarrollada por nuestro equipo para reconstruir las condiciones climáticas y de cultivo en la agricultura primitiva, basada en el análisis de la composición isotópica de carbono (enriquecimiento en ^{13}C) y nitrógeno (enriquecimiento en ^{15}N) en restos vegetales recuperados de yacimientos arqueológicos. El análisis de ^{13}C en cariopsides de cereales carbonizadas ha permitido cuantificar la disponibilidad hídrica de los cultivos en diversos yacimientos de la Península Ibérica y el Creciente Fértil, así como estimar su rendimiento en el pasado, mientras que el análisis de ^{15}N , nos aporta información cualitativa sobre las condiciones nutricionales. Por otro lado, el análisis de ^{13}C en restos forestales (carbones) ha permitido cuantificar las condiciones climáticas (precipitación y déficit hídrico) en los mismos yacimientos, aportando así información sobre el marco climático en el que se desarrollaron los cultivos.

The origin and development of agriculture is probably the the first example of large scale reciprocal interaction between humans and the environment. Recreating the environmental conditions favouring the onset of agriculture will contribute to infer the potential causes of this phenomenon, and to understand long term consequences of agricultural economy on the environment. We present the methodology used to recreate ancient climatic conditions and cropping techniques. It is based on isotopic analysis of carbon (^{13}C enrichment) and nitrogen (^{15}N enrichment), and it has been recently developed by our research team. ^{13}C enrichment in charred cereal caryopsides has been used to estimate water use efficiency and yield of ancient crops in several archaeological sites in the Iberian peninsula and the Fertile Crescent. ^{15}N enrichment provides qualitative information on crop nutrition. Finally, ^{13}C enrichment of charred wood (charcoal) has been used to quantify climatic conditions (rainfall and water deficit) in the same archaeological sites, providing further insights on the local ancient climate.

Introducción. La Agricultura en el Mediterráneo: historia de una larga coexistencia

La aparición y progresivo desarrollo de la agricultura a lo largo del Holoceno ha representado un camino sin retorno para la Humanidad, además de constituir un tipo de acción sobre el entorno exclusivo del hombre y propiciar el incremento demográfico, el desarrollo de estructuras sociales complejas que darían lugar a las grandes civilizaciones de la antigüedad y, finalmente, al mundo tal y como lo conocemos.

El paisaje Mediterráneo es el resultado de una interacción de miles de años entre el clima y las prácticas agrícolas, que se inicia en la transición entre el Pleistoceno y el Holoceno. Así, la agricultura occidental surge hace unos 10.000 años en el 'Creciente Fértil', una región de Oriente Próximo que comprende las llanuras de Mesopotamia, los desiertos de Siria y Palestina y algunas áreas montañosas del este de Anatolia. En esta región se localizan las primeras comunidades humanas que comienzan a cultivar en lugar de recolectar plantas silvestres. Este acontecimiento (acompañado de otras actividades englobadas en el término agricultura como es la ganadería), clave en el contexto de la denominada 'revolución neolítica', representó un hito en el desarrollo de la humanidad por cuanto supuso la primera vez que el hombre aprendió a adaptar el ambiente circundante para sus propios fines, además de ser un paso sin retorno (Zohary y Hopf, 1994; Harris, 1996; Damania *et al.*, 1998).

La adopción de la agricultura posiblemente constituya el primer ejemplo en el tiempo de interacción recíproca entre el clima y el hombre. Así, una de las hipótesis más aceptadas en el nacimiento de la agricultura considera el posible impacto de un cambio climático brusco al final del Pleistoceno (ver apartado siguiente). Otro factor a considerar sería la mayor productividad de la agricultura comparada con la recolección de plantas silvestres (Araus *et al.*, 2001), y el hecho de que la agricultura parece haber nacido en zonas 'marginales', lejos de las áreas geográficas del planeta de máxima producción natural (Zohary y Hopf, 1994). De hecho, la interacción en el tiempo entre clima y agricultura es de naturaleza muy compleja: a los cambios propios en las prácticas agrícolas (tecnológicos, de extensión, etc.) se une la variabilidad temporal y espacial inherente al clima. La agricultura ha repercutido profundamente en el desarrollo de nuestra sociedad, extendiéndose a través de Eurasia y alcanzando la costa Mediterránea española hace cerca de 8.000 años (Buxó, 1997). La rápida expansión a lo largo del Mediterráneo y la larga evolución posterior en la región, que abarca prácticamente desde los inicios del Holoceno hasta el presente, ha comportado su interacción compleja con factores de índole muy diversa: climáticos, sociales, tecnológicos, etc. Dar respuesta a los interrogantes surgidos de esta interacción es uno de los principales desafíos de este campo de la ciencia. Poco a poco se ha ido acopiando información sobre aspectos capitales que explicarían cuál ha sido la evolución del clima durante el Holoceno con relación a la adopción y posterior desarrollo de las actividades agrícolas, y cuál ha sido el grado de intervención humana sobre estas actividades con objeto de hacerlas relativamente independientes de las fuerzas de la naturaleza.

En definitiva, el conocimiento de la historia de la interacción entre clima y agricultura es de por sí muy relevante, pues puede aportar nueva luz sobre aspectos tales como, por ejemplo, a) el nacimiento y rápida expansión de la agricultura; b) su evolución temporal: ¿las condiciones de la agricultura han sido cada vez más dependientes o independientes del clima?; y c) de qué forma han afectado a la agricultura cambios súbitos del clima ocurridos durante el Holoceno. Referente al paisaje, la deforestación que padecen muchas zonas del Mediterráneo se iniciaría y progresaría con la introducción y posterior extensión de la agricultura. Sin embargo, no está del todo claro en qué medida una evolución del clima hacia condiciones de mayor aridez ha contribuido también a este efecto (Araus *et al.*, 1997a; Magny *et al.*, 2002). En este sentido, la reconstrucción climática basada en fuentes de información no influenciadas por la acción antrópica puede aportar las claves necesarias para responder a esta cuestión.

El clima durante el Holoceno

Tras el periodo frío y seco denominado *Younger Dryas* (ca. 12800-11500 cal. AP), se inicia el periodo cálido más largo y estable de los últimos 400.000 años, y que es la característica más destacada del Holoceno (Folland *et al.*, 2001). Este periodo coincide con la etapa de mayor desarrollo humano y, para algunos autores, fue un factor determinante en la aparición y desarrollo de la agricultura y, con ella, de la civilización. Sin embargo, el estudio detallado del Holoceno revela variaciones climáticas importantes a escala de 'milenios', aun siendo de menor magnitud que las precedentes. Así, entre 11500-10500 cal. AP el clima aún era más frío que en la actualidad, mientras que entre 9000-8200 cal. AP se torna más cálido y húmedo. Le sucede un periodo frío de unos 200 años, en torno al 8200 cal. AP (Alley *et al.*, 1997). Entre 8000 y 4500 cal. AP el clima fue algo más cálido y húmedo que en la actualidad, alcanzando a partir de entonces condiciones semejantes a las actuales, salvo algunos episodios fríos (2600 cal. AP, época fría de la edad de hierro; 1600-1800 n.e., pequeña edad del hielo) (Gribbin y Lamb, 1978) y cálidos (900-1400 n.e., periodo cálido medieval) (Gribbin y Lamb, 1978; Bradley *et al.*, 2001).

No obstante, las implicaciones de estas reconstrucciones climáticas globales pueden ser muy variables a escala regional y/o local. En particular, los regímenes de precipitación muestran una gran heterogeneidad espacial en la respuesta a procesos climáticos globales, como son la oscilación del Atlántico Norte o el fenómeno de El Niño (Rodó *et al.*, 1997; Muñoz-Díaz y Rodrigo, 2003). Pequeñas alteraciones del delicado equilibrio de factores que definen el clima del Mediterráneo pueden causar importantes cambios climáticos, cuyo efecto variará en función de la situación geográfica, como ya se ha podido constatar en el pasado. Así, por ejemplo, parece ser que el periodo frío de hace unos 8000 años comportó un aumento de humedad en el NE de la Península Ibérica (Pérez-Obiol y Julià, 1994; Schulte *et al.*, 2004), siendo más seco en el sur de la Península Ibérica (Magny *et al.* 2003), así como en el Próximo Oriente (Van Zeist y Bottema, 1988; Willcox, 1999).

A escala regional, actualmente se dispone de reconstrucciones climáticas de alta resolución temporal en las dos vertientes del Mediterráneo. En la Península Ibérica, buena parte de estos estudios se basan en la reconstrucción de la vegetación en el pasado, bien sea a partir de la palinología (Pérez-Obiol y Julià, 1994; Jalut *et al.*, 2000; López-Sáez *et al.*, 2003; Schulte *et al.*, 2004), o del estudio de carbones fósiles o antracología (Badal, 1990; Piqué, 1998; Allué, 2002). El estudio de la vegetación, sin embargo, presenta el inconveniente de reflejar también el efecto de la acción humana, lo que reduce su utilidad paleoclimática tras la consolidación de la agricultura (López-Sáez *et al.*, 2003).

Otra fuente importante de información es la reconstrucción de los niveles de lagos, basada en una combinación de métodos estratigráficos y geoquímicos (Rodó *et al.*, 2002; Riera *et al.*, 2004), y que ha permitido obtener información sobre la temperatura y disponibilidad de agua en la Península. Complementan estos estudios las diversas técnicas de reconstrucción de la temperatura marina, tanto en el Atlántico como en el Mediterráneo, ya que ésta determina en gran medida el clima del continente (ej. Nebout *et al.*, 2002).

En el Próximo Oriente, debido a la extrema aridez del clima, los estudios paleoclimáticos son relativamente escasos, y a menudo restringidos a las áreas más húmedas. En esta región, la información más relevante se ha obtenido a partir de estudios palinológicos (Van Zeist y Bottema, 1988) y antracológicos (Willcox, 1999), además de algunos registros sedimentológicos, muy localizados, como es el caso del Mar Muerto (Enzel *et al.*, 2003).

Interacción clima y agricultura: algunos apuntes

Los dos factores ambientales que más limitan la productividad agrícola en ambientes Mediterráneos son la disponibilidad hídrica (asociada a la climatología; Loss y Siddique, 1994) y las condiciones de fertilidad nitrogenada del terreno (Lopes *et al.*, 2004). En este sentido, las prácticas agronómicas (y en menor medida, la elección del material vegetal) pueden hacer al cultivo menos dependiente de las características de clima y suelo. Como consecuencia, cualquier proyecto de investigación en este campo ha de plantear reconstruir las condiciones ambientales del cultivo ligadas al clima, como son la disponibilidad hídrica y la demanda evapotranspirativa, y también al estatus nitrogenado de la planta. Basándose en estos resultados y en la disponibilidad de semillas arqueológicas, se puede igualmente determinar en qué medida los cambios con el tiempo en una característica como es el tamaño de la cariósida en cereales presentan una base genética y, finalmente, se puede evaluar la productividad alcanzada por los cultivos en la antigüedad. Los cereales han sido los cultivos por excelencia asociados al nacimiento de la agricultura occidental y los más ampliamente cultivados desde la antigüedad, y se les puede considerar, en buena medida, como responsables del paisaje mediterráneo tal y como lo conocemos en la actualidad (Puigdefábregas, 1992; Araus *et al.*, 1997b). Por todos estos motivos, su uso está justificado como herramientas de reconstrucción paleoambiental.

Condición *sine qua non* para el estudio de la interacción en el tiempo entre clima y agricultura es la circunscripción de las reconstrucciones paleoclimáticas y de condiciones de cultivo a zonas geográficas comunes. Cualquier investigación que se pretenda realizar se ha de plantear sobre la base del análisis simultáneo de restos arqueobotánicos forestales y de cultivos procedentes de un extenso conjunto de yacimientos arqueológicos, que representan una continuidad temporal desde los inicios de la agricultura, emplazados en las dos latitudes extremas del Mediterráneo. La metodología de reconstrucción ambiental que emplea nuestro equipo implica el análisis de diferentes isótopos estables en los restos arqueobotánicos (ver siguientes apartados). Esta metodología de reconstrucción produce estimaciones cuantitativas (no cualitativas) de las variables climáticas y de cultivo de manera simultánea y limitadas a una zona geográfica concreta (determinada en cada caso por la del yacimiento arqueológico).

Isótopos estables y reconstrucción paleoclimática

Aunque a escala regional la evolución climática está bien definida, tanto para el Oriente Próximo como para la Península Ibérica, son necesarios análisis que permitan conocer las condiciones climáticas locales, lo cual implica el uso de muestras de distribución menos restringida. En este sentido, los restos de maderas procedentes de yacimientos arqueológicos proporcionan un material ideal, pues existe una abundante información fisiológica y ecológica sobre la relación entre la composición de isótopos estables en madera y diferentes parámetros ambientales (Dupouey *et al.*, 1993; Saurer *et al.*, 1997; Ferrio *et al.*, 2003; Ferrio y Voltas, 2005). En efecto, la composición isotópica de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) de la celulosa en anillos de crecimiento está correlacionada con las temperaturas medias anuales y la humedad relativa (Dupouey *et al.*, 1993; Saurer *et al.*, 1997; Ferrio y Voltas, 2005), mientras que la composición isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) se ha relacionado con la pluviometría total, con la evapotranspiración, con el contenido de agua del suelo, así como con diferentes índices de estrés tanto a nivel de toda la estación como de ciertos periodos específicos (ej. Dupouey *et al.*, 1993; Saurer *et al.*, 1997; Ferrio *et al.*, 2003). Algunos autores han aportado evidencias indirectas de que la señal climática de la $\delta^{13}\text{C}$ se podía preservar en maderas carbonizadas (February y Van der Merwe, 1992; Vernet *et al.*, 1996). Sin embargo, nuestro equipo ha sido pionero a escala mundial en la calibración de un modelo para cuantificar la precipitación en el pasado a partir del análisis de carbonos fósiles, que tenga en cuenta el efecto de la carbonización sobre la señal isotópica de las maderas (Ferrio *et al.*, en revisión).

Como apuntamos más arriba, la reconstrucción climática está basada en las relaciones ecofisiológicas existentes entre variables de clima y la composición en isótopos estables ($\delta^{13}\text{C}$) de restos arqueológicos forestales (Ferrio *et al.*, 2005b). No obstante, los modelos de reconstrucción climática a aplicar a los restos fósiles se han desarrollado utilizando material actual. La relación entre $\delta^{13}\text{C}$ y pluviometría (Fig. 1) descrita por nuestro equipo (Ferrio *et al.*, 2003) presenta unas características de saturación para valores incrementales de pluviometría en *Quercus ilex* y *Pinus halepensis*. El modelo por el momento no es generalizable a cualquier especie forestal. Falta por verificar si la naturaleza de dicha relación se mantiene para otras especies de los géneros *Quercus* y *Pinus* presentes en los yacimientos, así como especies de géneros distintos. En cualquier caso los diversos modelos desarrollados con material actual se han de corregir según el impacto de la carbonización sobre $\delta^{13}\text{C}$, de acuerdo a la metodología establecida por nuestro equipo (Ferrio *et al.*, 2005b) para *Pinus halepensis*. Finalmente, se han de aplicar los modelos a los restos arqueobotánicos, obteniéndose estimaciones pluviométricas para los distintos yacimientos y dataciones.

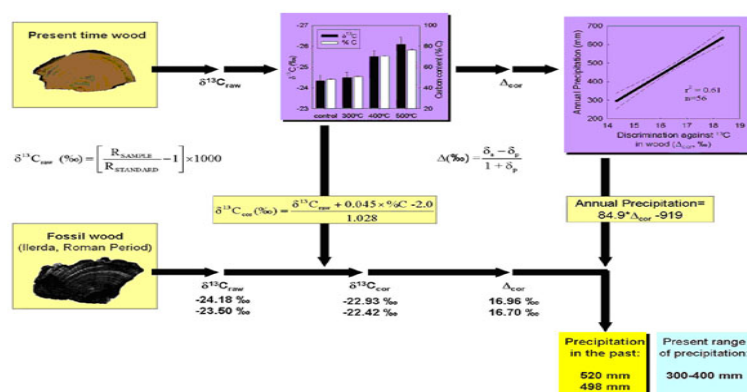


Figura 1. Ejemplo de inferencia de la precipitación anual a partir de carbonos arqueológicos. La composición isotópica de carbono ($\delta^{13}C_{raw}$) se determinó por espectrometría de masas en carbonos de pino carrasco recuperados por flotación en el yacimiento arqueológico. El efecto de la carbonización sobre la $\delta^{13}C_{raw}$ se evaluó por medio de carbonizaciones experimentales de material actual. A partir de este experimento, los valores de $\delta^{13}C_{raw}$ fueron corregidos para estimar $\delta^{13}C$ de la madera intacta ($\delta^{13}C_{cor}$), usando el porcentaje de carbono (%C) como indicador del grado de carbonización. A continuación, se calculó la discriminación isotópica de carbono (Δ) para considerar la variación temporal en la $\delta^{13}C$ del aire (δ_{air}). La relación entre Δ de madera y la precipitación anual se estableció a partir de muestras actuales (Ferrio et al. 2003; Ferrio y Voltas 2005). Finalmente, la ecuación resultante fue usada para inferir la precipitación anual a partir de la Δ de carbonos.

El déficit hídrico (o demanda evapotranspirativa relativa), determinado mediante el cociente (pluviometría / evapotranspiración potencial), presenta una relación similar con $\Delta^{13}C$ a la descrita para pluviometría (Ferrio et al., 2003), si bien los ajustes alcanzados en *Quercus ilex* y *Pinus halepensis* han sido superiores. También falta comprobar si la naturaleza de dicha relación se mantiene para especies distintas a las de los géneros *Quercus* y *Pinus*. Finalmente, los modelos se han de aplicar a los restos arqueobotánicos para obtener estimaciones de déficit hídrico para los distintos yacimientos y dataciones.

Isótopos estables y reconstrucción de las condiciones de cultivo

Buena parte de los estudios sobre la composición isotópica de carbono ($\delta^{13}C$) en el ámbito de la arqueología se han centrado en la reconstrucción de paleodietas a partir del análisis de restos humanos (ver ref. en Pollard 1998). Alternativamente, la $\delta^{13}C$ medida en cariósides carbonizadas ha sido propuesta por nuestro equipo como un método para evaluar el agua recibida por el cultivo (por precipitación y/o prácticas de irrigación) en la agricultura del pasado (Araus et al. 1997ab; Araus et al. 1999a), o para la estimación del rendimiento de cereales en el pasado (Araus et al. 1999b, 2001). Aunque se ha propuesto la evaluación del régimen hídrico y el rendimiento del pasado mediante otras técnicas (Helbaek 1960; Rosen y Weiner 1994) o a partir de estudios etnográficos y reconstrucciones arqueológicas (Anderson 1992; Van der Veen y Palmer 1997), el análisis de la $\delta^{13}C$ en granos fósiles es una herramienta más sencilla y directa, a la vez que aplicable a toda clase de cultivos con metabolismo fotosintético C_3 . Por otra parte, la interpretación de la variabilidad en la composición isotópica de oxígeno ($\delta^{18}O$)

en plantas no es tan directa como en el caso de la $\delta^{13}C$. No obstante, diversas observaciones han puesto en evidencia la existencia de una relación entre la conductancia estomática y la composición isotópica de la materia orgánica (DeNiro y Epstein 1979), si bien los estudios de $\delta^{18}O$ en especies herbáceas (como son el trigo y la cebada) son bastante más escasos que los existentes en especies forestales. En particular, son inexistentes en cebada, habiéndose publicado un trabajo sobre la existencia de una clara relación entre la $\delta^{18}O$, y la transpiración y temperatura del cultivo en trigo harinero (Barbour et al. 2000). Nuestro equipo ha trabajado durante los pasados 4 años estudiando las relaciones entre la $\delta^{18}O$ en

granos de trigo harinero (Mateo, Ferrio, Abdallah y Araus, datos no publicados) y de trigo duro (Villegas, Royo, Mateo, Araus, datos no publicados) con resultados que anticipan la posibilidad de utilizar este isótopo como indicador paleoambiental en cultivos. Respecto a las fuentes de variación de la abundancia natural de ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$) en plantas, éstas son diversas, pudiendo reflejar niveles de abonado (Riga *et al.* 1971; Högborg 1997), el empleo de distintas fuentes de nitrógeno (Riga *et al.* 1971; Evans *et al.* 1996), así como variaciones en la disponibilidad hídrica (Handley *et al.* 1999). En este contexto, existen algunos estudios sobre sistemas agrícolas (Riga *et al.* 1971; Feigin *et al.* 1974), dedicados a caracterizar la relación existente entre los valores de $\delta^{15}\text{N}$ y los diferentes tratamientos culturales (irrigación, niveles y tipo de abonado, laboreo, rotación de cultivos). Nuestro equipo viene estudiando durante los últimos años cómo las condiciones hídricas afectan la $\delta^{15}\text{N}$ en granos de trigo duro y harinero (Lopes *et al.*, 2004).

El término 'condiciones de cultivo' incluye características de naturaleza diversa: a) relacionadas con el ambiente de cultivo (asociadas a las prácticas agronómicas); b) relacionadas con el material vegetal empleado (mejora genética vegetal); y, finalmente c) resultantes de las dos características anteriores (productividad alcanzada por el cultivo). Los estudios de inferencia se realizan basándose en la conjunción de metodologías diversas a partir del material arqueológico: caracterización isotópica del material, análisis del tamaño de los restos (cariópsides), y contenido en nitrógeno de los mismos. Los modelos están desarrollados para trigo y cebada. En los modelos se emplean, tanto cariópsides de cultivos actuales como con granos fósiles a ser posible procedentes de los mismos yacimientos donde se analizan los restos de maderas.

De manera similar a los modelos comentados en el apartado de reconstrucción climática, basados en la relación entre composición isotópica de la madera y clima (Ferrio *et al.*, 2003; 2005; Ferrio y Voltas, 2005) (**Fig. 1**), los modelos de reconstrucción de la disponibilidad hídrica de cultivos de cebada (Araus *et al.*, 1997) y trigo (Araus *et al.*, 1999a) se fundamentan en la relación existente entre $\delta^{13}\text{C}$ de cariópsides y variación ambiental (debida a la pluviometría y/o al riego) bajo condiciones actuales (**Fig. 2**).

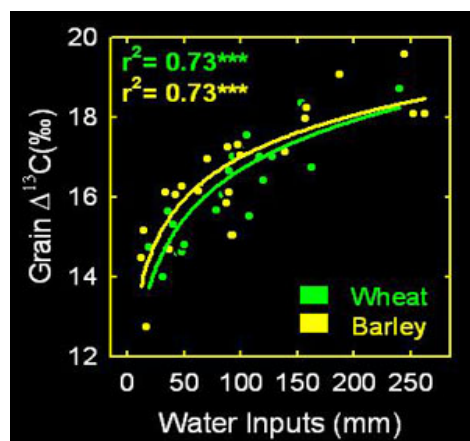


Figura 2. Relaciones entre aporte hídrico y la discriminación isotópica del carbono en cariópsides de trigo. Redibujado de los modelos de reconstrucción de la disponibilidad hídrica de cultivos de cebada (Araus *et al.* 1997) y trigo (Araus *et al.* 1999a; Ferrio *et al.* 2003).

La reconstrucción de las condiciones de cultivo se basa en las relaciones ecofisiológicas existentes entre ciertas variables ambientales con relevancia agronómica y la composición en isótopos estables de restos arqueológicos agrícolas (Araus *et al.*, 1999a). Así la relación entre $\Delta^{13}\text{C}$ y disponibilidad hídrica está descrita por nuestro equipo (Araus *et al.*, 1997a, b, 1999a) para trigo y cebada y se basa en la relación existente entre la discriminación isotópica y la cantidad de agua total recibida por el cultivo durante el llenado del grano.

Aunque a nivel más cualitativo que cuantitativo (a diferencia de los modelos de reconstrucción basados en $\Delta^{13}\text{C}$) la información derivada de la influencia que diversas técnicas de cultivo presentan sobre el contenido en N y firma isotópica $\delta^{15}\text{N}$ de las cariopsis de cereales, conjuntamente con la caracterización del impacto de la carbonización sobre dichas variables, se puede utilizar para inferir el estado nutricional de los antiguos cultivos y reflexionar sobre posibles prácticas agrícolas implementadas a tal efecto. Así, la $\delta^{15}\text{N}$ de los granos puede reflejar la fuente nitrogenada que emplea el cultivo, mientras que la cantidad de nitrógeno disponible por el cultivo (relacionada con el aporte externo de nitrógeno) puede afectar a la relación negativa bien conocida en cereales (García del Moral *et al.*, 1998) entre concentración de nitrógeno y tamaño del grano. Estas metodologías pueden permitir diferenciar con cierto grado de certeza el uso de prácticas culturales dedicadas a mejorar el estatus nitrogenado de los cultivos.

Para calcular el tamaño y peso original de las cariopsis fósiles (trigo y cebada) es necesario aplicar correcciones sobre las dimensiones resultantes producto de la carbonización. A tal efecto se puede utilizar un modelo basado en el tamaño de las cariopsis arqueológicas y que emplea el porcentaje de carbono de las mismas como indicador del proceso de carbonización (Ferrio *et al.*, 2004). Mediante su aplicación se obtendrán estimas de tamaño del grano para muestras de las que también se dispone de caracterización isotópica $\Delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$, y contenido en N. Esta información puede permitir conocer el impacto relativo de las condiciones agronómicas sobre un componente fundamental de la calidad del cultivo como es el tamaño del grano, y caracterizar la posible incidencia de las actividades de mejora genética, efectuadas de forma empírica, a lo largo del tiempo.

La reconstrucción de la productividad de cultivos de trigo y cebada en el pasado se puede inferir a partir de las relaciones existentes entre rendimiento y firma isotópica $\Delta^{13}\text{C}$ de cariopsis, publicadas por nuestro equipo (Araus *et al.*, 1999b, 2001) (**Fig. 3**).

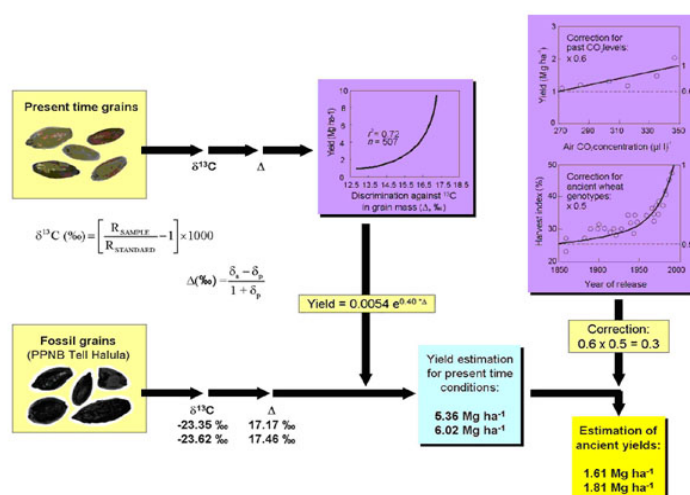


Figura 3. Ejemplo de inferencia del rendimiento en cereales cultivados en el pasado. La composición isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) se determinó por espectrometría de masas en semillas carbonizadas, recuperadas por flotación en el yacimiento arqueológico. A continuación, se calculó la discriminación isotópica de carbono (Δ) para considerar la variación temporal en la $\delta^{13}\text{C}$ del aire (δ_{air}). La relación entre Δ de semillas y el rendimiento se estableció a partir de muestras actuales. La ecuación resultante fue usada para inferir el rendimiento a partir de la Δ de semillas carbonizadas (Araus *et al.* 1999b, 2001). La estimación del rendimiento fue corregida para considerar la variación genética reciente en el índice de cosecha (multiplicando por 0,5), de acuerdo a la información agronómica de cultivares de trigo de diferentes épocas (1860-1990) cultivados en las mismas condiciones. Una corrección adicional consideró las diferencias en la concentración de CO_2 entre la actualidad (ca. 350 ppm) y el periodo del Neolítico precerámico B (PPNB, ca. 275 ppm), multiplicando el rendimiento por 0,

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto CGL2005-08175-C02/BOS Diez mil años de interacción clima - agricultura en el Mediterráneo. Inferencias basadas en el análisis de restos arqueobotánicos agrícolas y forestales.

Nota 1: n.e: nuestra era. [Volver](#)

Nota 2: $\delta^{13}\text{C}$ = proporción relativa del isótopo estable ^{13}C respecto a ^{12}C en un material, basada en la comparación con un patrón internacional de referencia (la caliza Pee Dee). Se calcula como $\delta^{13}\text{C} = (\text{Rmuestra}/\text{Rpatrón}) - 1 \times 1000$, donde R muestra y R patrón corresponden a la proporción $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ en la muestra y el patrón, respectivamente. (ver **Fig. 1**) [Volver](#)

Nota 3: $\Delta^{13}\text{C}$: Empobrecimiento relativo en ^{13}C de un producto respecto al sustrato que lo origina. Se calcula como $\Delta^{13}\text{C} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{sustrato}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{producto}}) / (1 - \delta^{13}\text{C}_{\text{producto}}/1000)$ (ver **Fig. 1** y Nota 2). [Volver](#)

Referencias

Alley, R.B., Mayewski, P.A., Sowers, T., Stuiver, M., Taylor, K.C. y Clark, P.U. 1997. Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago. *Geology* 25: 483-486.

Allué, E. 2002. *Dinámica de la vegetación y explotación del combustible leñoso durante el Pleistoceno Superior y el Holoceno del Noreste de la Península Ibérica a partir del análisis antracológico*. Ph.D. Thesis, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona.

Anderson, P.C. 1992. Experimental cultivation, harvest and threshing of wild cereals and their relevance for interpreting the use of Epipalaeolithic and Neolithic artefacts, En: P.C. Anderson (Ed.). *The Prehistory of Agriculture. New Experimental and Ethnographic Approaches*, pp. 179-209. Paris: CNRS.

Araus, J.L., Febrero, A., Buxo, R., Camalich, M.D., Martín, D., Molina, F., Rodríguez-Ariza, M.O. y Romagosa, I. 1997a. Changes in carbon isotope discrimination in grain cereals from different regions of the western Mediterranean Basin during the past seven millennia. Palaeoenvironmental evidence of a differential change in aridity during the late Holocene. *Global Change Biology* 3: 107-118.

Araus, J.L., Buxo, R., Febrero, A., Camalich, M.D., Martín, D., Molina, F., Rodríguez-Ariza, M.O. y Voltas, J. 1997b. Identification of Ancient Irrigation Practices based on the Carbon Isotope Discrimination of Plant Seeds: a Case Study from the Southeast Iberian Peninsula. *Journal of Archaeological Science* 24: 729-740.

Araus, J.L., Febrero, A., Catala, M., Molist, M., Voltas, J. y Romagosa, I. 1999a. Crop water availability in early agriculture: evidence from carbon isotope discrimination of seeds from a tenth millennium BP site on the Euphrates. *Global Change Biology* 5: 233-244.

Araus, J.L., Slafer, G.A. y Romagosa, I. 1999b. Durum wheat and barley yields in antiquity estimated from ^{13}C discrimination of archaeological grains: a case study from the Western Mediterranean Basin. *Australian Journal of Plant Physiology* 26: 345-352.

Araus, J.L., Slafer, G.A., Romagosa, I. y Molist, M. 2001. FOCUS: Estimated wheat yields during the emergence of agriculture based on the carbon isotope discrimination of grains: evidence from a 10th millennium BP site on the Euphrates. *Journal of Archaeological Science* 28: 341-350.

Badal, E. 1990. *Aportaciones de la antracología al estudio del paisaje vegetal y su evolución en el cuaternario reciente en la costa mediterránea del País Valenciano y Andalucía (18000-3000 BP)*. Ph.D. Thesis, Universidad de Valencia, Valencia.

Barbour, M.M., Fischer, R.A., Sayre K.D. y Farquhar G.D. 2000. Oxygen isotope ratio and grain material correlates with stomatal conductance and grain yield in irrigated wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* 27: 625-637.

Bradley, R.S., Briffa, K.R., Crowley, T.J., Hughes, M.K., Jones, P.D. y Mann, M.E. 2001. The scope of medieval warming. *Science* 292: 2011-2012.

Buxó, R. 1997. *Arqueología de las Plantas. La explotación económica de las semillas y los frutos en el marco mediterráneo de la Península Ibérica*. Ed. Crítica. Barcelona.

Damania, A.B., Valkoun, J., Willcox, G. y Qualset, C.O. (Ed.). 1998. *The Origins of Agriculture and Crop Domestication*. Aleppo: ICARDA.

Deniro M.J y Epstein S. 1979. Relationship between oxygen isotope ratios of terrestrial plant cellulose, carbon dioxide and water. *Science* 204: 51-53.

Dupouey, J.L., Leavitt, S.W., Choisnel, E. y Jourdain, S. 1993. Modelling carbon isotope fractionation in tree rings based on effective evapotranspiration and soil water status. *Plant, Cell and Environment* 16: 939-947.

Enzel, Y., Bookman, R., Sharon, D., Gvirtzman, H., Dayan, U., Ziv, B. y Stein, M. 2003. Late Holocene climates of the Near East deduced from Dead Sea level variations and modern regional winter rainfall. *Quaternary Research* 60: 263-273.

Evans, R.D., Bloom, A.J., Sukrapanna, S.S. y Ehleringer, J.R. 1996. Nitrogen isotope composition of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. CV. T-5) grown under ammonium and nitrate nutrition. *Plant, Cell and Environment* 19: 1317-1323.

February, E.C. y Van Der Merwe, N.J. 1992. Stable carbon isotope ratios of wood charcoal during the past 4000 years: anthropogenic and climatic influences. *South African Journal of Science* 88: 291-292.

Feigin, A., Shearer, G., Kohl, D.H. y Commoner, K. 1974. The amount and nitrogen-15 content of nitrate in soil profiles from two Central Illinois fields in a corn-soybean rotation. *Soil Science Society of American Proceedings* 38: 465-471.

Ferrio, J.P., Florit, A., Vega, A., Serrano, L. y Voltas, J. 2003. $\delta^{13}\text{C}$ and tree-ring width reflect different drought responses in *Quercus ilex* and *Pinus halepensis*. *Oecologia* 137: 512-518.

Ferrio, J.P., Alonso, N., Voltas, J. y Araus, J.L. 2004. Estimating grain weight in archaeological cereal crops: a quantitative approach for comparison with current conditions. *Journal of Archaeological Science* 31: 1635-1642.

Ferrio, J.P. y Voltas, J. 2005. Carbon and oxygen isotope ratios in wood constituents of *Pinus halepensis* as indicators of precipitation, temperature and vapour pressure deficit. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 57B, 164-173.

Ferrio, J.P., Araus, J.L., Buxó, R., Voltas, J. y Bort, J. 2005. Water management practices and climate in ancient agriculture: inference from the stable isotope composition of archaeobotanical remains. *Vegetation History and Archaeobotany* 14 (4):510-517.

Ferrio, J.P., Alonso, N., López, J.A., Araus, J.L. y Voltas, J. Carbon isotope composition of fossil charcoal reveals aridity changes in the East Mediterranean Basin (en revisión).

Folland, C.K., Karl, T.R., Christy, J.R., Clarke, R.A., Gruza, G.V., Jouzel, J., Mann, M.E., Oerlemans, J., Salinger, M.J. y Wang, S.W. 2001. Observed climate variability and change. En: J.T.Houghton *et al.* (Eds.). *Climate Change 2001: the scientific basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. pp. 101-181. Cambridge University Press. Cambridge. (http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm).

García Del Moral, L.F., Sopena, A., Montoya, J.L., Polo, P., Voltas, J., Codesal, P., Ramos, J.M. y Molina-Cano, J.L. 1998. Image analysis of grain and chemical composition of the barley plant as predictors of malting quality in Mediterranean environments. *Cereal Chemistry* 75: 755- 761.

Gribbin, J. y Lamb, H.H. 1978. Climatic change in historical times. En: J.Gribbin (Ed.). *Climatic change*. pp. 68-82. Cambridge University Press. Cambridge.

Handley, L.L., Austin, A.T., Robinson, D., Scrimgeour, C.M., Raven, J.A. y Heaton, T.H.E. 1999. The ^{15}N abundance of ecosystem samples reflects measures of water availability. *Australian Journal of Plant Physiology* 26: 185-199.

Harris, D.R. 1996. Introduction: themes and concepts in the study of early agriculture. En: D.R. Harris (ed.). *The Origins and Spread of Agriculture and Pastoralism in Eurasia*. pp. 1-9. London: University College London Press.

Helbaek, H. 1960. Cereals and weed grasses in Phase A. En: R.J. Braidwood, L.S. Braidwood. (Eds.). *Excavations in the plain of Antioch I*, pp. 540-543. Chicago: University of Chicago Press.

- Högberg, P. 1997. ^{15}N natural abundance in soil-plant systems. *New Phytologist* 95: 179-209.
- Jalut, G., Esteban-Amat, A., Bonnet, L., Gauquelin, T. y Fontugne, M. 2000. Holocene climatic changes in the Western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 160: 255-290.
- Lopes, M., Nogués, S. y Araus, J.L. 2004. Nitrogen source and water regime effects on barley photosynthesis and isotope signature. *Functional Plant Biology* 31: 995-1003.
- López-Sáez, J.A., López-García, P. y Burjachs, F. 2003. Arqueopalinología: Síntesis crítica. *Polen* 12: 5-35.
- Loss, S.P. y Siddique, K.H.K. 1994. Morphophysiological and physiological traits associated with wheat yield increases in Mediterranean environments. *Advances in Agronomy* 52: 229-275.
- Magny, M., Miramont, C. y Sivan, O. 2002. Assessment of the impact of climate and anthropogenic factors on Holocene Mediterranean vegetation in Europe on the basis of palaeohydrological records. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 186: 47-59.
- Magny, M., Begeot, C., Guiot, J. y Peyron, O. 2003. Contrasting patterns of hydrological changes in Europe in response to Holocene climate cooling phases. *Quaternary Science Reviews* 22: 1589-1596.
- Muñoz-Díaz, D. y Rodrigo, F.S. 2003. Effects of the North Atlantic oscillation on the probability for climatic categories of local monthly rainfall in southern Spain. *International Journal of Climatology* 23: 381-397.
- Nebout, N., J.L. Turon, R. Zahn, L. Londeix, L. Capotondi y K. Pahnke. 2002. Enhanced aridity and atmospheric high pressure stability over the western Mediterranean during North Atlantic cold events of the past 50,000 years. *Geology* 30: 863-866.
- Pérez-Obiol, R. y Julià R. 1994. Climatic change on the Iberian Peninsula recorded in a 30,000-yr pollen record from lake Banyoles. *Quaternary Research* 41: 91-98.
- Piqué, R. 1998. Dinàmica paleoambiental entre 80.000-5.000 BP al nord-est de la Península Ibèrica: les dades antracològiques. *Revista d'Arqueologia de Ponent* 8: 7-17.
- Pollard, A.M. 1998. Archaeological reconstruction using stable isotopes. En: H. Griffiths (Ed.). *Stable Isotopes*, pp. 285-301. Oxford: BIOS Scientific Publishers Ltd.
- Puigdefàbregas, J. 1992. Mitos y perspectivas sobre la desertificación. Erosión y desertificación en España. *Ecosistemas* 3: 18-22.
- Riera, S., Wansard, G. y Julià, R. 2004. 2000-year environmental history of a karstic lake in the Mediterranean Pre-Pyrenees: the Estanya lakes (Spain). *Catena* 55: 293-324.
- Riga, A., Van Praga, H.J. y Brigode, N. 1971. Rapport isotopique naturel de l'azote dans quelques sols forestiers et agricoles de Belgique soumis à différents traitements culturaux. *Geoderma* 6: 213-222.
- Rodó, X., Baert, E. y Comin, F.A. 1997. Variations in seasonal rainfall in southern Europe during the present century: Relationships with the North Atlantic Oscillation and the El Niño Southern Oscillation. *Climate Dynamics* 13: 275-284.
- Rodó, X., Giralt, S., Burjachs, F., Comin, F.A., Tenorio, R.G. y Julià, R. 2002. High-resolution saline lake sediments as enhanced tools for relating proxy paleolake records to recent climatic data series. *Sedimentary Geology* 148: 203-220.
- Rosen, A.M. y Weiner, S. 1994. Identifying ancient irrigation: a new method using opaline phytoliths from emmer wheat. *Journal of Archaeological Science* 21:125-132.
- Saurer, M., Aellen, K. y Siegwolf, R. 1997. Correlating $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in cellulose of trees. *Plant, Cell and Environment* 20: 1543-1550.
- Schulte, L., Julià, R. y Rosell-Melé A. 2004. The Catalan Network of Palaeoclimatology (PALAEOCAT). *PAGES News* 12: 5-6.

Van Der Veen y M., Palmer, C. 1997. Environmental factors and the yield potential of ancient wheat crops. *Journal of Archaeological Science* 24:163-182.

Van Zeist y W., Bottema, S. 1988. Late Quaternary vegetational and climatic history of Southwest Asia. En: 'Palaeoclimatic & palaeoenvironmental change in Asia during the last 4 million years:'. pp. 129-148. Indian National Science Academy. New Delhi.

Vernet, J.L., Pachiaudi, C., Bazile, F., Durand, A., Fabre, L., Heinz, C., Solari, M.E. y Thiebault, S. 1996. Le $\delta^{13}\text{C}$ de charbons de bois préhistoriques et historiques méditerranéens, de 35000 BP a l'actuel. Premiers resultats. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, série II a* 323: 319-324.

Willcox, G. 1999. Charcoal analysis and Holocene vegetation history in southern Syria. *Quaternary Science Reviews*. 18: 711-716.

Zohary, D. y Hopf, M. 1994. *Domestication of Plants in the Old World* (Second Edition). Clarendon Press, Oxford.